

## 이산화탄소 및 수증기의 혼합율에 따른 대향류 화염의 연소특성 연구

박원희\* · 조법진\*\* · 김태국\*\*\*

## Study on Combustion Characteristics of the Opposed Flames for Different Mixing Rates of Carbon Dioxide and Water Vapor

Won-Hee Park\*, Bum-Jin Jo\*\*, Tae-Kuk Kim\*\*\*

## ABSTRACT

Detailed flame structures of the opposed flames formed for different oxidant compositions are studied numerically. The detailed chemical reactions are modeled by using the CHEMKIN code. Only the CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O are assumed to participate by absorbing the radiative energy while all other gases are assumed to be transparent. The discrete ordinates method and the narrow band based WSGGM with a gray gas regrouping technique are applied for modeling the radiative transfer through non-homogeneous and non-isothermal combustion gas mixtures generated by the opposed flow flames. The results show that the different radiation model can cause different results for flame structures and the WSGGM with gray gas regrouping is successful in modeling the opposed flames with non-gray gas mixture. The numerical results show that the increases in CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O compositions cause to reduce the flame temperature and the NO formation.

**Key Words** : Radiative heat transfer, Opposed Flame, Combustion, Laminar Flow, WSGGM, Discrete Ordinates Method

## 기 호

|           |                                |
|-----------|--------------------------------|
| $T$       | 온도[K]                          |
| $I$       | 복사강도[W/m <sup>2</sup> sr]      |
| $x$       | 흡수계수[m <sup>-1</sup> ]         |
| $x_{i0}$  | 흡수계수 모델상수[K <sup>2</sup> /atm] |
| $L$       | 통과거리[m]                        |
| $M$       | 회색가스 수                         |
| $N_i$     | $i$ 번째 그룹의 회색가스 수              |
| $P$       | 대기압[atm]                       |
| $q$       | 복사열유속[W/m <sup>2</sup> ]       |
| $X$       | 물분율                            |
| $W$       | 총괄 가중치                         |
| $W(\eta)$ | 회색가스의 좁은밴드별 가중치                |

|              |                        |
|--------------|------------------------|
| 그리스 문자       |                        |
| $a_i$        | 흡수계수 모델상수 [K]          |
| $\eta$       | 파동수[cycles/s]          |
| $\mu$        | x방향 여현                 |
| $\phi$       | 당량비(equivalence ratio) |
| $\omega_m$   | 각도 가중치                 |
| $\Delta\eta$ | 밴드두께                   |
| $\tau$       | 통과율                    |

|     |             |
|-----|-------------|
| 하첨자 |             |
| $i$ | $i$ 번째 회색가스 |
| $b$ | 흑체          |
| mix | 혼합가스        |
| new | 재조합         |

|     |         |
|-----|---------|
| 상첨자 |         |
|     | 좁은밴드 평균 |

\* 중앙대학교 대학원, 현 철도기술연구원

\*\* 중앙대학교 대학원

\*\*\* 중앙대학교 기계공학부

e-mail : kimtk@cau.ac.kr

## 1. 서 론

고온 상태에서 작동하는 시스템 내부의 열전달 및 연소특성은 복사에너지 전달과 밀접하게 연관

되어 있다. 산화제 성분 변화에 따른 연소 분위기의 변화는 연소 특성에 지대한 영향을 주며, 이 때 가스에 의한 복사열전달은 연소영역의 열적 평형상태를 결정짓는데 중요한 변수가 된다. 복사열전달은 사용하는 연료의 종류, 산화제의 화학적 성분 구성, 연소에 의하여 생성되는 연소가스의 화학성분 그리고 시스템 주위 벽면의 온도 및 복사 특성 등에 따라 변화하며 연소가스의 유동에 따른 대류 현상과도 밀접하게 연관되어 있다. 현재까지 복사열전달과 연소 모델에 관한 연구는 분리된 독립 연구과제로 추진되어, 이들의 상관관계에 대한 연구결과는 국내외를 막론하고 매우 드문 실정이다. 세계적으로 고성능 및 저공해 연소기술 개발이 절실한 현 시점에서 연소 분위기와 관련하여 복사열전달의 연소 특성에 미치는 영향에 대한 연구는 그 중요성이 매우 크다고 할 수 있다.

본 연구에서는 광학적으로 얇은 매체 모델(Optically thin model), SNB 모델<sup>[1]</sup> 및 재조합을 적용한 회색가스가중합법(WSGGM-RG)<sup>[2]</sup>을 이용하여 복사열전달이 확산화염의 특성에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 대향류화염을 해석하기 위하여 OPPDIF프로그램<sup>[3]</sup>이 이용되었으며, 각각의 복사 모델을 이용하여 복사열전달을 고려한 경우와 복사열전달을 고려하지 않은 경우의 화염 구조를 살펴보았다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 대향류 연소시스템

본 연구에서는 연소 현상을 해석하는데 비교적 용이한 그림 1과 같은 대향류 연소시스템을 고려하였다. 대향류 화염은 연료 노즐과 산화제 노즐의 중심축은 일직선상에 있고, 이 둘이 서로 마주 보고 있는 상태에서 연료 및 산화제가 방출되어 만들어지는 화염을 말한다. 이와 같은 연소시스템에서는 축대칭 유동에 의해 두 노즐 사이에 유동의 정체(stagnation)가 발생하게 된다. 정체면의 위치는 양쪽 운동량에 의존하게 되며, 산화제 노즐 쪽의 유량이 연료측 유량보다 클 경우 화염 면은 연료 노즐 쪽에 가까운 곳에 생성된다. 대향류화염은 화염의 상세한 화학반응 및 화염구조에 대한 실험연구를 비교적 쉽게 수행할 수 있어 많은 연구자들의 관심의 대상이 되고 있다. 또한 여기서 얻은 층류화염에 관한 특성은 여러 연소 장치에 광범위하게 적용될 수 있다. 층류화염을 이해하는 것 자체도 중요한 의미를 가지며 더 나아가 난류 화염을 연구하는데 있어서 층류 화염의 이해가 필수적이라는데 더 큰 의미가 있다.

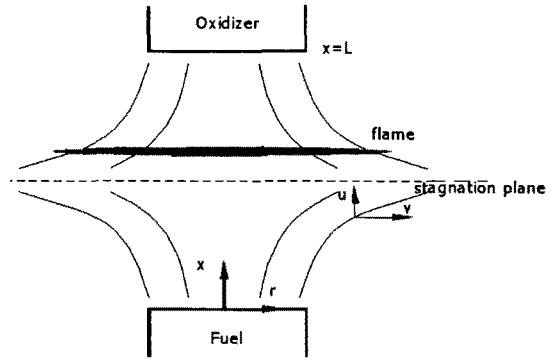


Fig. 1 Schematic of the opposed flow flame.

### 2.2 보존 방정식

대향류 연소시스템을 해석하기 위해 그림 1의 좌표계를 고려하여 여러 보존 방정식을 나타낼 수 있다. 정상상태에서 원통좌표계를 이용한 연속방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho v r) = 0 \quad (1)$$

여기서  $u$  및  $v$ 는 축방향 및 반경방향의 속도이며,  $\rho$ 는 혼합 기체의 밀도이다. 축방향 속도를 비롯한 온도 및 모든 물리량이  $x$ 만의 함수라는 가정에 따라 연속방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{dJ}{dx} - G = 0 \quad (2)$$

여기서  $J = \rho u/2$ 는 축 방향 질량유속 성분을 나타내고,  $G = -\rho v/r$ 는 반경 방향 질량유속 성분을 각각 나타낸다.

반경방향의 운동량방정식은 다음과 같다.

$$H - 2 \frac{d}{dx} \left( \frac{JG}{\rho} \right) + \frac{3G^2}{\rho} + \frac{d}{dx} \left[ \mu \frac{d}{dx} \left( \frac{G}{\rho} \right) \right] = 0 \quad (3)$$

여기서  $\mu$ 는 점성계수이며,  $H = (1/\rho)(\partial p/\partial r)$ 는 반경방향 압력구배의 고유치이다. 또한 에너지방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\rho u \frac{dT}{dx} - \frac{1}{c_p} \frac{d}{dx} (\lambda \frac{dT}{dx}) + \frac{\rho}{c_p} \sum_k C_{pk} Y_k V_k \frac{dT}{dx} - \frac{1}{c_p} \sum_k h_k \dot{w}_k + \frac{\nabla \cdot q}{c_p} = 0 \quad (4)$$

여기서  $T$ ,  $C_p$ ,  $\lambda$ 는 온도, 혼합기체의 정압비열 및 열전도계수이다.  $-\nabla \cdot q$ 은 복사열전달로 인한 복사열 생성항이며 2.3절에서와 같이 구할 수 있다.  $C_{pk}$ ,  $Y_k$ ,  $h_k$ ,  $\dot{w}_k$ 는  $k$ 번째 종의 정압비열, 질량분율, 생성엔탈피, 화학종 생성율을 각각 나타내며 화학종의 보존방정식은 다음과 같다.

$$\rho u \frac{dY_k}{dx} - \frac{d}{dx} (\rho Y_k V_k) - \dot{\omega}_k W_k = 0 \quad (5)$$

여기서  $W_k$ 는  $k$ 번째 종의 분자량이며,  $V_k$ 는 화학종  $k$ 의 확산속도로서 다음과 같다.

$$V_k = \frac{1}{X_k \bar{W}} \sum_{j=1}^K W_j D_{kj} \frac{dX_j}{dx} - \frac{D_k^T}{\rho Y_k} \frac{1}{T} \frac{dT}{dx} \quad (6)$$

여기서  $D_{kj}$  및  $D_k^T$ 는 다성분 확산계수 및 열확산 계수이며,  $X_k$ 는 화학종  $k$ 의 몰분율,  $K$ 는 혼합기체에 존재하는 가스 종의 수이다. 그리고 상태방정식은 다음과 같다.

$$p = \frac{\rho RT}{\bar{W}} \quad (7)$$

여기서  $\bar{W}$ 는 혼합가스의 평균분자량이다. 각각 지배방정식에 대한 경계조건은 다음과 같다.

$$x=0 : F = \frac{\rho F u_F}{2}, G=0, T = T_F, \quad (8)$$

$$\rho u Y_k + \rho Y_k V_k = (\rho u Y_k)_F$$

$$x=L : F = -\frac{\rho_0 u_0}{2}, G=0, T = T_0, \quad (9)$$

$$\rho u Y_k + \rho Y_k V_k = (\rho u Y_k)_0$$

첨자  $F$  및  $O$ 는 연료 및 산화제 노즐에서의 값을 나타낸다. 대향류 확산화염의 스트레인율은 다음과 같은 식을 이용하여 구할 수 있다.<sup>[4]</sup>

$$a = \frac{2(-u_0)}{L} \left[ 1 + \frac{u_F}{(-u_0)} \sqrt{\frac{\rho_F}{\rho_0}} \right] \quad (10)$$

### 2.3 비회색 복사가스 열전달

#### 2.3.1 혼합가스에 대한 WSGGM

이산화탄소-수증기 혼합가스에서 좁은 밴드 내에서의 각각의 통과율은 파장의 변화에 대한 상관관계가 크지 않다는 것이 알려져 있다<sup>[5,6]</sup>. 따라서 혼합가스의 좁은 밴드 통과율은 각 가스의 좁은 밴드 통과율의 곱으로 나타낼 수 있다<sup>[7]</sup>.

$$\bar{\tau}_{mix}(\eta) = \bar{\tau}_{CO_2}(\eta) \cdot \bar{\tau}_{H_2O}(\eta) \quad (11)$$

이산화탄소-수증기 혼합가스에 있어서 통과율의 회색가중합 표현은 다음과 같다.<sup>[2,8]</sup>

$$\bar{\tau}_{mix}(\eta) = \sum_{ic=1}^{M_{CO_2}} \sum_{ih=1}^{M_{H_2O}} W_{ic, CO_2}(\eta) \times W_{ih, H_2O}(\eta) e^{-(k_{ic, CO_2} + k_{ih, H_2O})} \quad (12)$$

식 (12)의 좁은밴드 통과율은 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\bar{\tau}_{mix}(\eta) = \sum_{i=1}^{M_{mix}} W_{i, mix}(\eta) e^{-k_{i, mix} L} \quad (13)$$

식 (12)와 (13)을 비교하면 혼합가스의 파장별 가중치  $W_{i, mix}(\eta)$ 와 흡수계수는 다음과 같다.

$$W_{i, mix}(\eta) = W_{ic, CO_2}(\eta) \times W_{ih, H_2O}(\eta) \quad (14)$$

$$k_{i, mix} = k_{ic, CO_2} + k_{ih, H_2O} \quad (15)$$

혼합가스의 총괄가중치는 파장별가중치의 Planck평균 형태로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$W_{i, mix} = \frac{\sum_{\eta} W_{i, mix}(\eta) \Delta\eta}{\sum_{\eta} I_b(\eta) \Delta\eta} \quad (16)$$

Kim과 Song<sup>[9]</sup>은 수증기에서 흡수계수를 다양한 형태의 온도 및 압력에 대한 함수관계를 검토하였으며, 본 연구에서는 다음과 같은 형태로 혼합가스의 흡수계수를 표현하였다.

$$k_{mix} = k_{i_0, CO_2} \frac{e^{-\alpha_{i_0, CO_2} T}}{T^2} P X_{CO_2} + k_{i_0, H_2O} \frac{e^{-\alpha_{i_0, H_2O} T}}{T^2} P X_{H_2O} \quad (17)$$

여기서  $k_{i_0}$ ,  $\alpha_i$ 는  $i$ 번째 회색가스의 모델링 상수이고  $P$ ,  $T$ ,  $X$ 는 각각 압력, 온도, 몰분율이다.

Park과 Kim<sup>[2]</sup>은 계산 결과의 정확도를 유지하면서 컴퓨터 계산 시간은 줄이기 위해 비슷한 크기를 갖는 회색가스의 흡수계수를 그룹으로 나누어서 고려하는 회색가스 재조합(gray gas regrouping)을 제안하였다.

$$W_{i, \neq w}(\eta) = \sum_{j=1}^{N_i} W_{j, mix}(\eta) \quad (18)$$

$i$ 번째 그룹의 흡수계수  $k_{i, \neq w}$ 는 플랑크평균 형태의 흡수계수를 이용하여 구할 수 있다.  $i$ 번째 그룹의 흑체에너지는  $W_{i, \neq w}$ 로 표현되며  $k_{i, \neq w}$ 는 해당 그룹에 속하여 있는 각각의 흡수계수의 가중치의 가중된 평균으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$k_{i, \neq w} = \frac{\sum_{j=1}^{N_i} k_{j, mix} W_{j, mix}}{W_{i, \neq w}} \quad (19)$$

#### 2.3.2 복사열전달의 해석

그림 1과 같은 대향류 연소시스템의 해석을 위하여 두 노즐 사이의 연소 가스에 의한 복사열전달은 1차원 무한 평판으로 가정하여 해석할 수가 있다.

거리  $L$  만큼 떨어진 흑체 무한평판에 실제 가스가 채워진 형상에서 임의의 방향  $m$  및 위치  $p$ 에서의 복사강도를 회색가스가중합법을 이용하여 차분된 구분종과 방정식으로 나타내면 다음과 같다<sup>[10,11,12]</sup>.

$$I_{i, p, m} = \frac{\mu_m I_{i, w, m} + f W_{i, p, h, s} \Delta x_p}{\mu_m + f W_{i, p, h, s} \Delta x_p} \quad (19)$$

위식에서 하첨자  $i$ 는  $i$ 번째 회색가스,  $p$ 는 위치  $p$ 점,  $m$ 은 방향을 각각 나타낸다.  $\mu_m$ 은  $m$ 방

향의 방향코사인,  $f$ 는 검사체적 요소의 동쪽 표면상의 복사강도  $I_{i,e,m}$ 을 구하기 위해 필요한 가중치이며,  $I_{i,b,m}$ 는 가중치  $f$ 를 이용하여  $I_{i,e,m}$   $I_{i,u,m}$ 과 함께 다음과 같이 구할 수 있다

$$I_{i,b,m} = fI_{i,e,m} + (1-f)I_{i,u,m} \quad (20)$$

상수  $f$ 에 따라 복사강도 값이 음의 값으로 되는 불합리한 상황을 피하기 위해 가중치를 1.0으로 설정하였다.  $p$ 점에서의 복사열생성항은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$-\nabla \cdot q_p = \left[ \sum_{m=1}^{N_g} \mu_m (I_{u,m} - I_{e,m}) \omega_m \right] LSLANTZ_p \quad (21)$$

여기서,  $\omega_m$ 은  $m$ 방향에 대한 각 가중치이며,  $N_g$ 는 고려된 총 각도 구역 수이다.

### 3. 해석 결과 비교 검토

본 연구에서 고려된 대항류 연소시스템의 두 노즐사이의 거리는 2cm, 총 기압은 1기압이다. 3.1절의 연료 및 산화제 노즐 온도는 298K로 고려하였으며 스트레인율을 적용하여 양쪽 유량을 조절하여 계산을 수행하였다. 3.2절에서의 노즐 온도는 600K로 설정하였고 당량비  $\phi$ 는 1.1로 고려하였다. 시스템에 사용된 화학반응, 열역학 및 전달 물성은 각각 Chemkin-II<sup>[13]</sup>와 Transport Package<sup>[14]</sup>를 이용하였으며 상세반응 기구로는 GRI 3.0<sup>[14]</sup>를 사용하였다. 이 반응기구는 53개의 화학종을 고려하고 있으며, 325개의 화학반응으로 이루어져 있다. 희석가스가중합법 및 SNB 모델을 이용할 경우에는 계산시간을 고려하여 1차원 복사열전달의 해석은 S<sub>10</sub>의 구적적분을 활용하였다. 모든 복사 모델에 있어 화학종은 이산화탄소와 수증기만이 복사열의 전달에 영향을 미치는 것으로 가정하였다.

#### 3.1 복사 가스 모델에 따른 결과 비교

혼합가스의 비희석 복사특성을 모델링하는 방법에 따른 해석 결과의 차이를 살펴보기 위해 연료 성분으로는 메탄 (CH<sub>4</sub>)이 사용되었으며 산화제로는 표준공기가 이용되었다. Strain율은 5로 고려하여 해석을 수행하였다. 그림 2 및 3은 복사 모델 별로 해석한 화염의 온도 및 복사생성항의 분포를 각각 나타내고 있다. 이들 그림을 비교하면 화염의 온도가 증가하는 부분에서 복사생성항이 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 광학적으로 얇은 모델은 화염 내의 복사열의 재흡수 ( $-\nabla \cdot q$ ) 특성을 예측하지 못하는 반면 제안된 WSGGM-RG10과 SLW 및 SNB 모델은 모든 화염에 있어 복사열의 재흡수를 잘 예측하는 것을 볼 수 있다. 복사열의 소멸이 가장 큰 부분에서

WSGGM-RG10 및 SLW 모델은 복사생성항을 유사하게 과대 예측하는 것을 볼 수 있지만 화염의 전체적인 구조를 비교해 보았을 때 본 연구에서 고려한 화염에서는 SLW 모델보다 WSGGM-RG10이 복사생성항을 더 잘 예측하는 것을 볼 수 있다. 표 1은 고려된 대항류 화염 특성을 나타내는 여러 가지 물리량의 최대치들을 복사 모델 별로 비교하고 있으며 앞에서 살펴본 바와 같이 WSGGM-RG10은 기준해인 SNB 모델의 결과와 상당히 비슷한 결과들을 나타내고 있음을 알 수 있다.

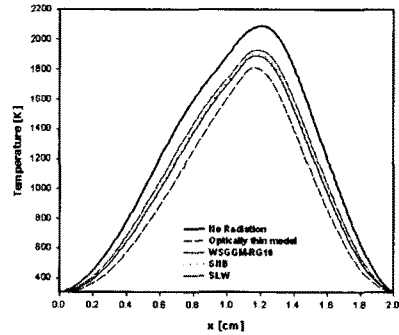


Fig. 2 Comparison of the temperature profile for different gas radiation models.

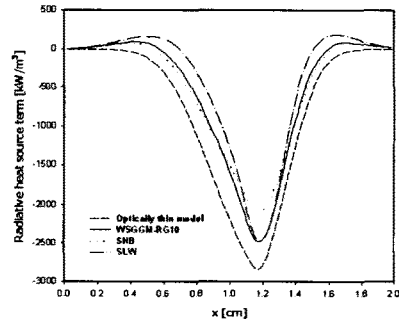


Fig. 3 Comparison of the radiative heat sources for different gas radiative models.

Table 1 Comparison of the peak values obtained from various radiation models.

| Models         | Temp.  | CO <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> O | CO     | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | NO       |
|----------------|--------|-----------------|------------------|--------|-------------------------------|----------|
| SNB (exact)    | 1904.0 | 0.0853          | 0.1735           | 0.0380 | 5.931e-3                      | 1.157e-4 |
| WSGGM-RG10     | 1890.6 | 0.0858          | 0.1753           | 0.0367 | 5.628e-5                      | 1.108e-4 |
| SLW            | 1928.4 | 0.0839          | 0.1747           | 0.0419 | 7.122e-5                      | 1.246e-4 |
| Optically thin | 1812.3 | 0.0891          | 0.1708           | 0.0272 | 3.158e-3                      | 8.338e-5 |
| No radiation   | 2089.6 | 0.0772          | 0.1786           | 0.0600 | 0.0116                        | 2.097e-4 |

#### 3.2 산화제의 성분 변화에 따른 화염구조

연소가스 중의 NO<sub>x</sub> 저감을 위한 배기가스 재순환 기법, CO<sub>2</sub>의 총량을 줄이기 위한 산소 부화 연소 기법 등은 최근의 연소 장치 설계에서

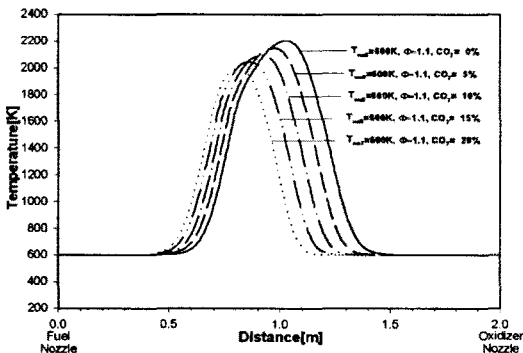
자주 도입되는 기법들이다. 이들 기법을 도입할 경우 화염의 구조가 어떻게 달라지는지를 자세히 살펴보기 위하여 전절에서 정확도가 확인된 바 있는 비희석 복사가스 모델인 WSGGM-RG10과 S<sub>10</sub>을 이용하여 대항류 화염을 분석하여 보았다.

**Table. 2** Chemical compositions of fuel and oxidizer considered for analyses.

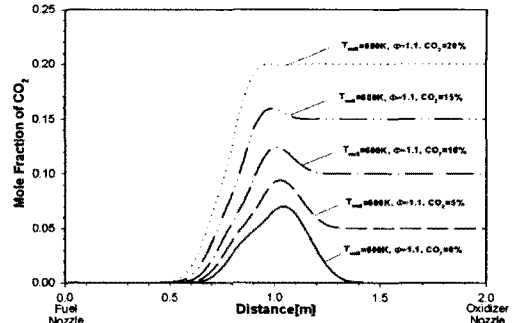
| φ   | Fuel            |                |                | Oxidizer With CO <sub>2</sub> |                |                | Oxidizer with H <sub>2</sub> O |                |                |
|-----|-----------------|----------------|----------------|-------------------------------|----------------|----------------|--------------------------------|----------------|----------------|
|     | CH <sub>4</sub> | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | CO <sub>2</sub>               | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> O               | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> |
| 1.1 | 0.80            | 0.17           | 0.63           | 0.00                          | 0.21           | 0.79           | 0.00                           | 0.21           | 0.79           |
|     | 0.80            | 0.17           | 0.63           | 0.05                          | 0.20           | 0.75           | 0.05                           | 0.20           | 0.75           |
|     | 0.80            | 0.17           | 0.63           | 0.10                          | 0.19           | 0.71           | 0.10                           | 0.19           | 0.71           |
|     | 0.80            | 0.17           | 0.63           | 0.15                          | 0.18           | 0.67           | 0.15                           | 0.18           | 0.67           |
|     | 0.80            | 0.17           | 0.63           | 0.20                          | 0.17           | 0.63           | 0.20                           | 0.17           | 0.63           |
| 1.5 | 0.80            | 0.17           | 0.63           | 0.00                          | 0.21           | 0.79           | 0.00                           | 0.21           | 0.79           |
|     | 0.80            | 0.17           | 0.63           | 0.05                          | 0.20           | 0.75           | 0.05                           | 0.20           | 0.75           |
|     | 0.80            | 0.17           | 0.63           | 0.10                          | 0.19           | 0.71           | 0.10                           | 0.19           | 0.71           |
|     | 0.80            | 0.17           | 0.63           | 0.15                          | 0.18           | 0.67           | 0.15                           | 0.18           | 0.67           |
|     | 0.80            | 0.17           | 0.63           | 0.20                          | 0.17           | 0.63           | 0.20                           | 0.17           | 0.63           |

**3.2.1 CO<sub>2</sub>변화에 따른 예측된 화염특성**

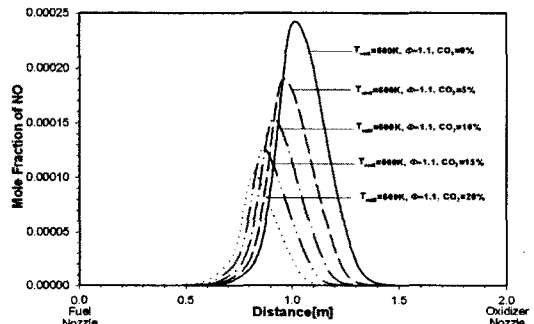
그림 4~6에는 산화제에 CO<sub>2</sub>를 혼합할 경우 CO<sub>2</sub>혼합비의 변화에 따른 온도, CO<sub>2</sub>분율, NO분율의 예측 결과들을 나타내고 있다. 연료 노즐에서는 80%의 공기와 20%의 CH<sub>4</sub>가 분사되고 산화제 노즐에서는 CO<sub>2</sub>의 함량이 성분 분율로 0%~20%를 차지하며 나머지는 공기로 구성된 산화제가 분사되고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 CO<sub>2</sub>의 함량이 높아질수록 연소온도 및 NO의 생성은 각각 낮아지고 반면에 발생하는 CO<sub>2</sub>의 양은 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 CO<sub>2</sub> 성분 분율이 20% 정도에 이르면 CO<sub>2</sub>의 생성이 임계치에 도달하게 되는 것을 알 수 있다.



**Fig. 4** Temperature profiles for different CO<sub>2</sub> mole fractions in oxidant.



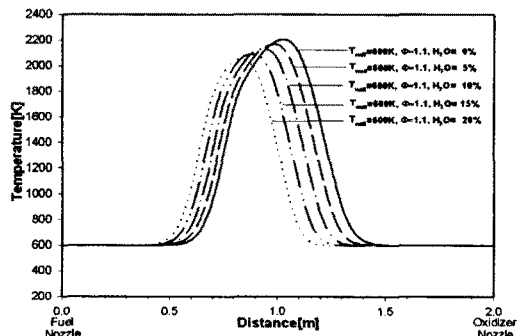
**Fig. 5** Mole fractions of CO<sub>2</sub> for different CO<sub>2</sub> mole fractions in oxidant.



**Fig. 6** Mole fractions of NO for different CO<sub>2</sub> mole fractions in oxidant.

**3.2.2 H<sub>2</sub>O변화에 따른 예측된 화염특성**

그림 7~9에는 3.2.1절과 마찬가지로 연료 노즐에서는 80%의 공기와 20%의 CH<sub>4</sub>가 분사되도록 하였다. 산화제 노즐에서는 H<sub>2</sub>O가 0%에서 20%의 성분 분율을 가지며 나머지는 공기로 구성된 산화제가 분사되도록 하였다. H<sub>2</sub>O의 함유량 증가에 따른 화염 구조의 변화를 예측한 결과들을 그림 7~9에 나타내었다. H<sub>2</sub>O의 함유량이 높아질수록 연소온도가 낮아지며 동시에 NO 및 CO<sub>2</sub>의 생성도 감소하는 것을 알 수 있다.



**Fig. 7** Temperature profiles for different H<sub>2</sub>O mole fractions in oxidant.

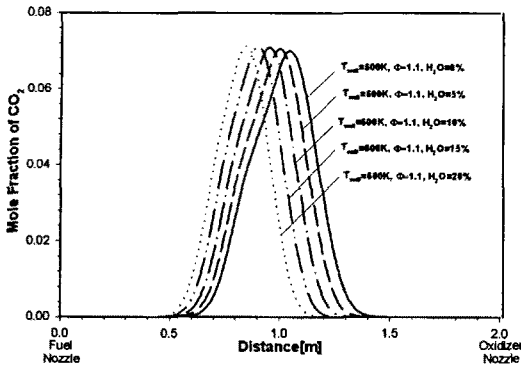


Fig. 8 Mole fractions of  $CO_2$  for different  $H_2O$  mole fractions in oxidant.

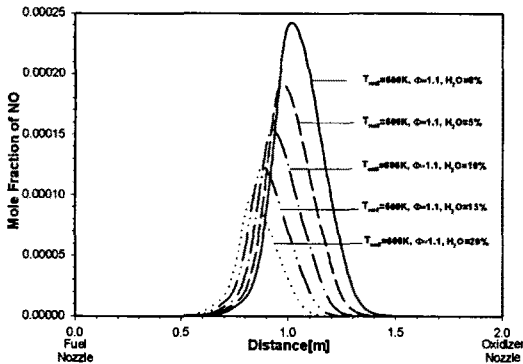


Fig. 9 Mole fractions of NO for different  $H_2O$  mole fractions in oxidant.

#### 4. 결론

본 연구에서는 대항류 층류화염의 특성을 분석하기 위하여 수치적인 방법을 이용하였다. 이때 비회색 혼합가스에 의한 복사열전달은 회색가스 재조합을 고려한 회색가가중합법 및 1차원 무한 평판을 가정한 구분중좌법을 각각 이용하여 해석하였다. 대항류 예혼합 화염에 SNB, WSGGM-RG, Optically thin model, No radiation method를 고려하여 얻은 결과들을 서로 비교하였으며, WSGGM-RG를 이용한 결과는 SNB를 이용한 결과와 비교하였을 때 매우 잘 일치하였고 경제적인 방법임을 확인하였다. 또한 optically thin model과 no radiation 모델을 대항류 화염에 적용할 경우 온도분포의 예측에서 약 10%내외의 오차가 있음을 알 수 있다. 수치 해석 결과  $CO_2$  및  $H_2O$ 의 혼합율이 증가될수록 연소온도는 낮아지고 NO의 생성은 줄어드는 것을 알 수 있었다.

#### 후기

본 연구는 연소기술연구센터(CERC)의 지원에 의해 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

[1] T. K. Kim, J. A. Menart, H. Lee, 1991, "Nongray Radiative Gas Analyses Using the S-N Technique", ASME Journal of Heat Transfer, vol.113, pp.946-952  
 [2] W.H.Park, T.K.Kim, "Study on regrouping of gray gas in spectral WSGGM for arbitrary mixtures of  $CO_2$  and  $H_2O$ ", Journal of Korean Society of Mechanical Engineers, B vol.27(2), pp.227-235  
 [3] E. Lutz, J.K. Robert, F.G. Joseph, M.R. Fran, Oppdif: a fortran program for computing opposed-flow diffusion flames, SAND96-8243, 1997.  
 [4] H. K. Chellian, C. K. Law, T. Uda, M.D.Smoke, F.A.Williams, 1990, "An Experimental and theoretical investigation of the dilution, pressure, and flow-field effects on the extinction condition of methane-air-nitrogen diffusion flames", Proceedings of the Combustion Institute, vol.23, pp.503-511  
 [5] R. M. Goody, R. West, L. Chen, D. Crisp, 1989, "The correlated-k method for radiation calculations in non-homogeneous atmospheres", Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, vol.42(6), 539-550.  
 [6] A. A. Lacis, V. Oinas, 1991, "A description of the correlated k-distribution method for modeling non-gray gaseous absorption, thermal emission, and multiple scattering in vertically inhomogeneous atmospheres", Journal of Geophysical Research, vol. 96(D5),9027-9063  
 [7] M. F. Modest, 1993, "The weighted-sum-of-gray-gases model for arbitrary solution methods in radiative transfer", ASME Journal of Heat Transfer, vol.113(3),650-656  
 [8] W.H.Park, T.K.Kim, "Application of the WSGGM for arbitrary gas mixtures of water vapor and carbon dioxide", Journal of Korean Society for Aeronautical & Space Science, vol.32(6),88-95  
 [9] O.J.Kim, T.H.Song, 1996, "Implementation of the weighted sum of gray gases model to a narrow band:application and validity", Numerical Heat Transfer Part B : Fundamentals, vol.30(4)  
 [10] M.K.Denison, B.W.Webb, 1993, "A Spectral line-based weighted-sum-of-gray-gases model for arbitrary RTE solvers", ASME Journal of Heat Transfer, vol.115, 1004-1011  
 [11] T.K.Kim, 1990, "Radiation and combined mode heat transfer analyses in absorbing, emitting and mie-anisotropic scattering media using the s-n discrete ordinates method", a doctoral thesis, the university of Minnesota  
 [12] M. F. Modest, 2003, "Radiative heat transfer", McGraw-Hill Book Co.  
 [13] R.J. Kee, F.M. Rupley, J.A. Miller, "A fortran chemical kinetics package for the analysis of gas phase chemical kinetics", SAND89-8009B, 1989.  
 [14] GRI Mech3.0, www.me.berkeley.edu/grimech/